第39卷 第6期
2022年11月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 39 No. 6
Nov. 2022

基于InVEST模型的新疆天山碳储量时空演变研究

卢雅焱[1,2]， 徐晓亮[1,3]， 李基才[2,4]， 冯小华[5]， 刘璐媛[6]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 新疆财经大学 旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830012；4. 新疆维吾尔自治区林业和草原局，新疆 乌鲁木齐 830000；5. 国家林业和草原局西北调查规划院，陕西 西安 710048；6. 美国东北大学，美国 波士顿 02115）

摘 要：研究土地利用变化对天山碳储量时空变化的影响机制，对于干旱区山地生态系统保护及区域经济社会可持续发展具有重要意义。基于1990—2020年新疆天山土地利用数据，利用InVEST模型碳储量模块，估算了1990—2020年新疆天山碳储量及其空间分布格局，分析了土地利用变化对碳储量的影响。结果表明：(1) 新疆天山土地利用类型以草地和未利用地为主，其次为永久冰川和积雪以及林地，灌木、水域、建设用地和湿地的面积较少。(2) 1990—2020年新疆天山碳储量整体上呈现持续增加趋势，共增加了19.49 Tg，草地、未利用地、林地对总碳储量的贡献最大。(3) 近30 a碳储量空间分布格局相对稳定，近88%的区域没有发生明显变化，其空间分布格局与垂直自然带分布密切相关。(4) 草地、永久冰川和积雪、未利用地3种土地利用类型的转化是新疆天山碳储量时空演变的主要贡献者。该研究可为干旱区山地生态系统碳平衡管理和减排增汇政策制定提供科学支撑，对于建设绿色丝绸之路和构建中国-中亚命运共同体具有重要意义。

关键词：碳储量；生态系统服务；InVEST模型；山地生态系统；新疆天山

陆地生态系统的碳储量在全球碳循环和气候变化中起着关键作用，对于降低大气中CO_2等温室气体浓度、调节区域小气候、减缓全球气候变化以及维持生态平衡具有重要意义[1-2]。2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和已成为我国重要的长期战略目标，加强陆地生态系统碳储量研究对于维持全球碳排放和碳吸收平衡方面具有重要影响[3]。关于陆地生态系统碳储量的相关研究主要集中在以下几个方面：(1) 碳储量估算研究，评估尺度从森林[4]、草地[5]、湿地[6]等单一生态系统类型向流域[2,7]、省域[8]、典型生态区[9]、国家[10]、全球[3]等不同空间尺度拓展。(2) 碳储量估算方法研究，从传统的样地清查法到目前遥感监测与模型相结合的方法，其中，生态系统服务评估模型(InVEST)碳储量模块因具有操作相对简单、参数调整灵活、评估结果可动态化和空间化表达等优点，被广泛应用于生态系统碳储量估算[2,7-9]。(3) 碳储量时空演变机制与影响因素研究[5,9]，区域土地利用变化导致的生态系统碳储量变化受到广泛重视。相关研究为增强陆地生态系统碳汇功能、实现双碳目标提供了重要借鉴，也为区域生态建设和经济社会可持续发展提供了科学依据。

随着丝绸之路经济带建设的深入推进，亚洲中部干旱区山地作为构建中国-中亚命运共同体的重要生态屏障，日益成为研究的热点。干旱区山地是景观多样性和生物多样性集聚地，也是生态脆弱区和环境变化敏感区。我国干旱区山地主要分布于降水稀少的西北内陆地区，冰川积雪、湖泊湿地、森林、草地、荒漠等构成了国家"两屏三带"生态格局中北方防沙带的重要空间载体，提供了涵养水源、固碳释氧、防止水土流失、防护自然灾害、提供粮食木材、保存特有文化、维护生物多样性等众多生态系统服务，在维护国家生态安全、推动北方地区高质量发展中具有不可替代的地位。

新疆天山是全球温带干旱区大型山地生态系统的最典型代表，也是全球变化的敏感地带，生态

收稿日期：2022-06-13； **修订日期：**2022-07-26
基金项目：中国科学院"西部青年学者"项目(2019-XBQNXZ-A-007)
作者简介：卢雅焱(1993-)，男，博士研究生，主要从事生态系统服务研究. E-mail: luyayan16@mails.ucas.ac.cn
通讯作者：徐晓亮. E-mail: xuxiaoliang@xjufe.edu.cn

环境十分脆弱，自然资源和能源相对富集，在亚洲中部干旱区生态地理格局中具有重要地位和作用，是影响新疆乃至我国中西部地区天气气候和生态环境的重要天然屏障[11]。新疆天山主要植被类型为草原、森林、灌丛、农田和荒漠，发育了从暖温带荒漠带到冰雪带的完整垂直自然带谱[12]。新疆天山中山森林带具有重要的水土保持、水源涵养和固碳功能[13]，对维系天山南北两侧绿洲农业和城镇发展具有极其重要的作用。加强新疆天山生态系统碳储量的时空格局研究，可以丰富干旱区山地生态系统服务研究，为干旱区可持续发展和气候变化减缓提供科学支撑。

因此，本研究基于土地利用数据，利用InVEST模型碳储量模块，选取1990年、2000年、2010年、2020年4个时段，分析了新疆天山生态系统碳储量时空演变特征及其与土地利用方式之间的关系，研究结果对科学制定和实施复杂的干旱区山地生态系统服务管理政策具有重要意义。

1　研究方法与数据来源

1.1　研究区概况

新疆天山(73°50′28″~95°33′56″N，39°24′40″~45°23′8″E)地处新疆中部(图1)，全长1852 km，由3条大山及其20多条山脉和10多个山间盆地或谷地等地貌单元组成[14]，跨越了克孜勒苏柯尔克孜自治州、喀什地区、阿克苏地区、伊犁哈萨克自治州、博尔塔拉蒙古自治州、塔城地区、巴音郭楞蒙古自治州、昌吉回族自治州、乌鲁木齐市、吐鲁番市、哈密市等11个地州市，面积约23.53×10^4 km^2，占新疆总面积14.13%，山脊线平均海拔4000 m，最高峰托木尔峰海拔7443 m。新疆天山属于典型的温带大陆性气候，山区年平均气温差异很大，天山北坡年平均气温2.5~5.0 ℃，南坡年平均气温7.5~10.0 ℃，山区多年平均年降水总量为987×10^8 m^3[14]。天山被誉为“中亚水塔”，是中亚众多河流的发源地，也是受气候变化影响最为敏感的地区之一[15]。新疆天山横亘新疆全境，是准噶尔盆地和塔里木盆地的天然地理分界，南北被塔克拉玛干沙漠和古尔班通古特两大沙漠夹持，形成了全球典型的山地—绿洲—荒漠生态系统，独特的生态系统使之成为全球36个生物多样性热点地区之一[16]。

1.2　数据来源

土地利用数据来源于zenodo(https://doi.org/10.5281/zenodo.4417810)，空间分辨率为30 m，总体精度达到79.31%[17]，能够满足研究需求。数据包括耕地、林地、灌木、草地、水域、永久冰川和积雪、未利用地、建设用地和湿地共9个土地利用类型，裁剪后得到1990年、2000年、2010年和2020年共4期新疆天山土地利用类型图。气温和降水数据来源于国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/)，分辨率为1 km。

1.3　研究方法

1.3.1　基于InVEST模型的碳储量评估　生态系统中的碳储存主要包括地上生物量、地下生物量、土壤碳和死亡有机碳4种基本碳库，根据不同土地利用类型的地上、地下、土壤和死亡有机物的平均碳密度进行计算，根据各类土地利用类型的面积乘以其碳密度并进行求和，得到研究区的总碳储量。其

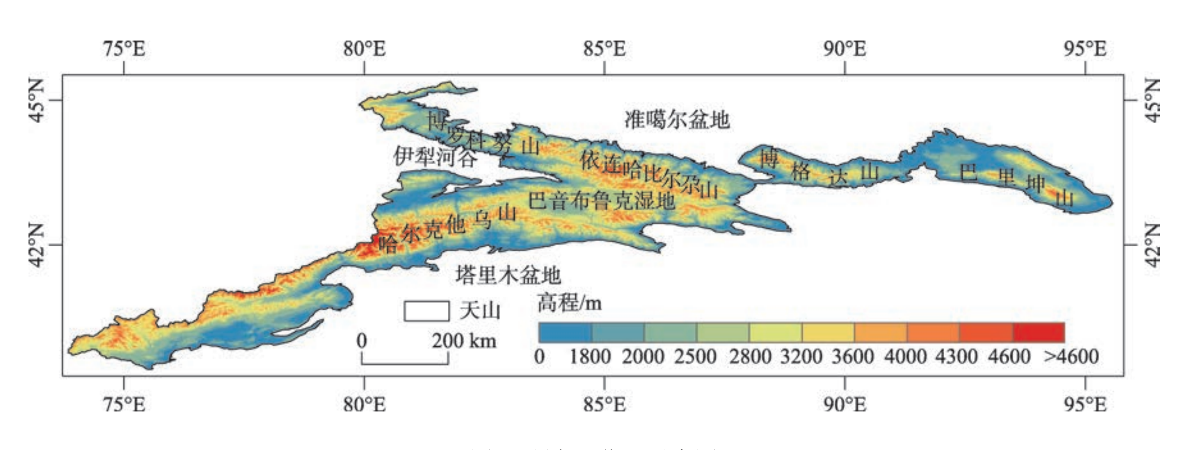


图1　研究区位置示意图

Fig. 1　Location map of the Xinjiang Tianshan Mountains

计算公式如下：

$$C_i = C_{i\text{-above}} + C_{i\text{-below}} + C_{i\text{-soil}} + C_{i\text{-dead}} \quad (1)$$

$$C_{total} = \sum_{i=1}^{n} C_i \times S_i \quad (2)$$

式中：C_i 为土地利用类型 i 的总碳密度（t·hm^{-2}）；$C_{i\text{-above}}$ 为土地利用类型 i 的地上生物量碳密度（t·hm^{-2}）；$C_{i\text{-below}}$ 为土地利用类型 i 的地下生物量碳密度（t·hm^{-2}）；$C_{i\text{-soil}}$ 为土地利用类型 i 的土壤碳密度（t·hm^{-2}）；$C_{i\text{-dead}}$ 为土地利用类型 i 的死亡有机物碳密度（t·hm^{-2}）；C_{total} 为生态系统总的碳储量（t）；S_i 为土地利用类型 i 的面积（hm^2）；n 为土地利用类型的数量，本文 n 为9。

1.3.2 *不同土地利用类型的碳密度及其修正* 研究区不同土地利用类型的碳密度数据主要来源于已有的相关研究[18-21]，碳密度数据的选取以新疆本地实测数据为主，其次为西北干旱半干旱区的相关研究，最后为全国数据，初步得到研究区的碳密度数据（表1）。

由于本研究区的碳密度数据主要来源于新疆乃至全国的研究结果，与实测数据可能存在一些误差。研究发现，生物量和土壤有机碳密度与降水存在正相关关系，与气温存在负相关关系[21]，该方法在干旱区得到广泛应用[22]。因此，可以利用气温和降水数据对初始碳密度数据进行修正，以得到本地化的碳密度数据，具体计算方法如下：

（1）考虑降水的回归模型（MAT≤10 ℃）：

$$C_{SP} = 79.1 + 0.07 \times MAP \quad (3)$$

$$C_{BP} = 14.4 + 0.03 \times MAP \quad (4)$$

（2）考虑气温的回归模型（MAP≤ 400 mm）：

$$C_{ST} = 100.5 - 5.8 \times MAT \quad (5)$$

$$C_{BT} = 16.7 - 1.3 \times MAT \quad (6)$$

考虑气温的回归模型（MAP > 400 mm）：

$$C_{ST} = 157.7 - 3.4 \times MAT \quad (7)$$

$$C_{BT} = 43.0 - 0.4 \times MAT \quad (8)$$

式中：C_{SP}和C_{ST} 分别为考虑降水和气温得到的土壤有机碳密度（t·hm^{-2}）；C_{BP} 和 C_{BT} 分别为考虑降水和气温得到的生物量碳密度（t·hm^{-2}）；MAT 和 MAP 分别为年均温（℃）和年降雨量（100 mm）。分别将天山和全国的年均温和年均降水量（1990—2020年）代入上述公式，得到修正系数：

$$K_{BP} = \frac{C'_{BP}}{C''_{BP}}, K_{BT} = \frac{C'_{BT}}{C''_{BT}} \quad (9)$$

$$K_{SP} = \frac{C'_{SP}}{C''_{SP}}, K_{ST} = \frac{C'_{ST}}{C''_{ST}} \quad (10)$$

式中：K_{BP}和K_{BT} 分别为考虑降水和气温的生物量碳密度修正系数；K_{SP}和K_{ST} 分别为考虑降水和气温的土壤有机碳密度修正系数；C'_{BP} 和 C''_{BP} 分别为天山和全国尺度考虑年降水得到的生物量碳密度数据；C'_{BT} 和 C''_{BT} 分别为天山和全国尺度考虑年均温得到的生物量碳密度数据；C'_{SP} 和 C''_{SP} 分别为天山和全国尺度考虑年降水得到的土壤有机碳密度数据；C'_{ST} 和 C''_{ST} 分别为天山和全国尺度考虑年均温得到的土壤有机碳密度数据。

$$K_B = \text{Average}(K_{BP}, K_{BT}) \quad (11)$$

$$K_S = \text{Average}(K_{SP}, K_{ST}) \quad (12)$$

式中：K_B 为生物量碳密度修正系数；K_S 为土壤有机碳密度修正系数。根据年降水量和年均温修正的

表1 不同土地利用类型的碳密度

Tab. 1 Carbon density values of different land use types in the Xinjiang Tianshan Mountains /（t·hm^{-2}）

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度(0~100 cm)	死亡有机物碳密度
耕地	4.22	5.01	89.94	1.24
林地	44.95	13.27	126.59	2.48
灌木	6.38	4.19	74.96	0.8
草地	0.71	6.24	88.69	0.22
水域	0.93	0.66	0	0
永久冰川和积雪	0	0	0	0
未利用地	0.66	1.26	45.26	0
建设用地	3.29	2.11	0	0
湿地	2.69	2.15	249.71	0

天山不同土地利用类型的碳密度见表2。

2 结果与分析

2.1 天山土地利用变化特征

由图2和表3可以看出，1990—2020年天山山区土地利用类型以草地为主，占研究区总面积60%左右，广泛分布于天山南北坡；其次为未利用地，占研究区总面积25%以上，主要分布在天山和塔里木盆地的过渡地带，该区域气候干旱，植被稀疏；再次为永久冰川和积雪以及林地，占研究区总面积5%左右，永久冰川和积雪主要分布在海拔较高的雪线以上区域，包括哈尔克他乌山、依连哈比尔尕山、博格达山等区域，林地分布于新疆天山北坡中山带和南坡河谷地带；而耕地、水域、湿地、灌木和建设用地等面积较少，均不足研究区总面积的2%。

从土地利用动态演变来看，1990—2020年未利用地、林地、耕地、水域、湿地均呈增加趋势，其中，未利用地面积增加最多，为6961.22 km^2；其次为林地，增加面积达到5452.89 km^2；天山山区耕地快速扩张，达到1056.71 km^2。草地和永久冰川积雪面积呈下降趋势，其面积分别减少了13017.22 km^2和1150.34 km^2。新疆气候整体呈现暖湿化趋势[15]，导致永久冰川积雪出现消退，从而水域和湿地面积增加。随着国家和自治区深入推进和实施退耕还林还草工程、天然林资源保护工程、三北防护林工程等重大工程建设，天山山区森林资源得到有效保护和恢复。放牧活动是草地主要利用方式之一，然而超载过牧会导致草地出现不同程度的退化[23]。

2.2 天山碳储量时空变化特征

利用InVEST模型碳储量模块计算得出，新疆天山1990年、2000年、2010年、2020年的总碳储量分别为1587.17 Tg、1604.47 Tg、1605.45 Tg、1606.66 Tg，平均碳密度分别为67.49 $t\cdot hm^{-2}$、68.23 $t\cdot hm^{-2}$、68.27 $t\cdot hm^{-2}$、68.32 $t\cdot hm^{-2}$。近30 a间，新疆天山碳

表2 修正的不同土地利用类型的碳密度

Tab. 2 Modified carbon density of different land use types in the Xinjiang Tianshan Mountains　/($t\cdot hm^{-2}$)

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度(0~100 cm)	死亡有机物碳密度
耕地	2.9	3.44	76.6	1.24
林地	30.89	9.12	107.82	2.48
灌木	4.38	2.88	63.84	0.8
草地	0.49	4.29	75.54	0.22
水域	0.64	0.45	0	0
永久冰川和积雪	0	0	0	0
未利用地	0.45	0.87	38.55	0
建设用地	2.26	1.45	0	0
湿地	1.85	1.48	212.68	0

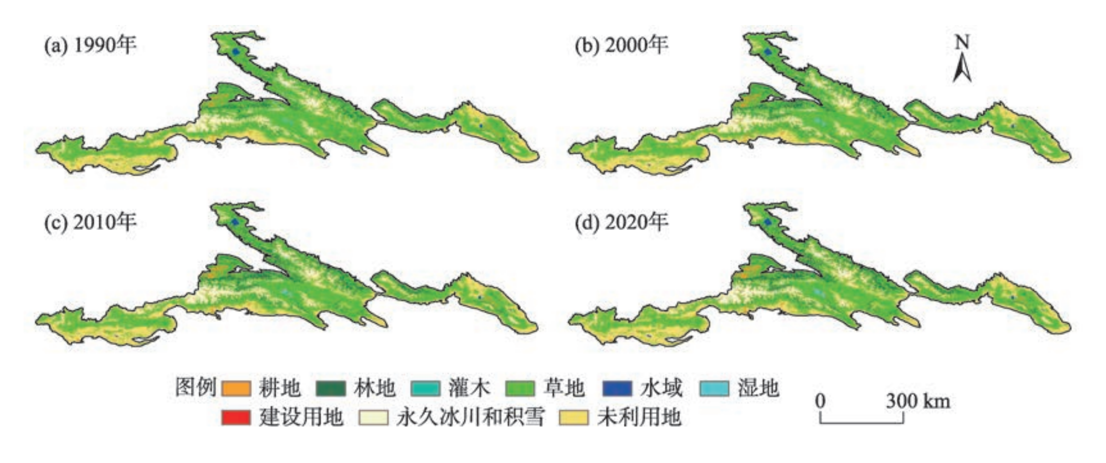


图2 1990—2020年新疆天山土地利用

Fig. 2 Land use map in the Xinjiang Tianshan Mountains from 1990 to 2020

表3 1990—2020年新疆天山土地利用类型变化

Tab. 3 Land use change in Xinjiang Tianshan Mountains from 1990 to 2020

土地利用类型	面积/km²			
	1990年	2000年	2010年	2020年
耕地	2162.87	2450.73	3122.42	3219.58
林地	6794.50	9556.86	11491.35	12247.38
灌木	0.73	0.11	0.05	1.52
草地	152046.48	147139.89	142531.77	139029.26
水域	792.56	1076.91	1170.54	1221.59
永久冰川和积雪	13637.15	12532.67	13843.15	12486.81
未利用地	59504.20	62056.27	62598.04	66465.42
建设用地	4.52	5.94	7.06	9.22
湿地	227.74	351.37	406.36	489.97

储量整体上呈现持续增加趋势，共增加19.49 Tg，年平均增加量为0.65 Tg，年平均增长率为1.23%。其中，1990—2000年总碳储量增加较快，达到17.30 Tg，占全部增加量88.76%，主要原因是林地面积显著增加。2000—2010年和2010—2020年碳储量呈缓慢增长，分别增加0.98 Tg和1.21 Tg。

从碳储量空间分布来看（图3），1990—2020年新疆天山碳储量空间分布格局变化较小。碳储量高值区主要分布于天山的山地草原带、中山森林带、亚高山草甸带、高山草甸带以及河谷地带、山间盆地，这些区域植被覆盖较好，固碳能力较强；碳储量低值区主要分布在山前荒漠带、高山垫状植被带和冰雪带。新疆天山碳储量空间分布格局与该区域垂直自然带的植被状况密切相关，即高值区域主要以林地、高覆盖度草地为主，而低值区域主要以荒漠草原、高山垫状植被等为主。

为了更加清晰地呈现新疆天山碳储量的空间演变过程，对不同时期碳储量分布图进行栅格减法运算，参考刘洋等[24]研究成果，将碳储量空间变化值分为三类，其中，变化值大于5%定义为增长区域，变化值小于-5%定义为碳储量减少区域，将变化值介于±5%之间的定义为碳储量基本不变区域。由图4可以看出，1990—2000年、2000—2010年以及2010—2020年超过90%的区域的碳储量基本没有发生变化，这表明大部分区域的土地利用均没有发生明显的变化，受人类活动的干扰较小。碳储量减少的区域从3.61%增加到4.01%，而碳储量增加的区域从4.37%下降到3.79%。总体来看，近30 a间，天山区域近88%区域的碳储量保持相对稳定的状态，碳储量增益和受损区域基本平衡。伊犁河谷、巴音布鲁克湿地等区域碳储量明显增加，西天山大部分区域碳储量均呈减少趋势。

2.3 土地利用变化对碳储量的影响

由表4可知，不同土地利用类型碳储量对新疆

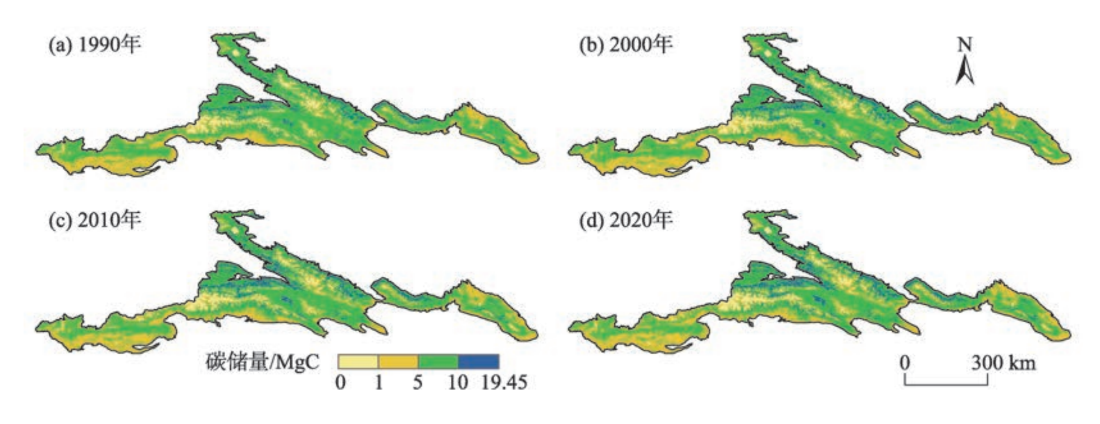


图3 1990—2020年新疆天山碳储量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of carbon storage in the Xinjiang Tianshan Mountains from 1990 to 2020

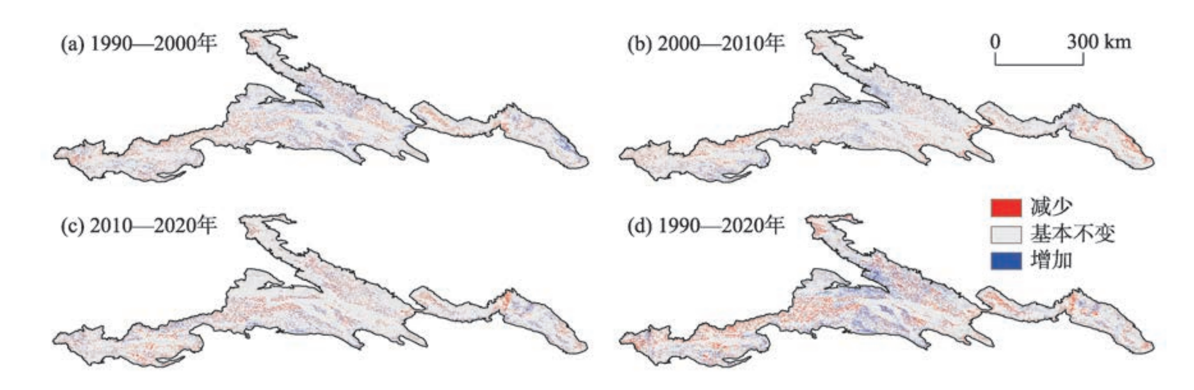


图4 1990—2020年新疆天山碳储量空间分布变化

Fig. 4 Spatial distribution changes of carbon storage in the Xinjiang Tianshan Mountains from 1990 to 2020

表4 1990—2020年新疆天山各土地利用类型碳储量的变化

Tab. 4 Carbon storage change of different land use in the Xinjiang Tianshan Mountains from 1990 to 2020

土地利用类型	碳储量/Tg			
	1990年	2000年	2010年	2020年
耕地	18.21	20.63	26.28	27.10
林地	102.13	143.65	172.73	184.09
灌木	0.01	0.00	0.00	0.01
草地	1224.58	1185.06	1147.95	1119.74
水域	0.09	0.12	0.13	0.13
永久冰川和积雪	0.00	0.00	0.00	0.00
未利用地	237.24	247.42	249.58	265.00
建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00
湿地	4.92	7.59	8.78	10.58

天山总碳储量的贡献从大到小为：草地、未利用地、林地、耕地、湿地、水域、灌木、建设用地、永久冰川和积雪，其中，草地、未利用地和林地是新疆天山主要的碳库。1990—2020年，尽管草地面积和碳储量均呈下降趋势，但其碳储量占新疆天山总碳储量的70%以上，是新疆天山最主要的碳库。未利用地的碳储量增加幅度不明显，其碳储量占总碳储量的15%以上。林地碳储量持续增加，面积仅占新疆天山总面积5.21%，但其碳储量占总碳储量的比例从1990年的6.43%增加到2020年的11.46%。

从不同土地利用类型碳储量时间变化来看，新疆天山不同时期不同土地利用类型的碳储量均发生了不同程度变化。1990—2020年，耕地、林地、未利用地和湿地的碳储量均明显增加，其中，林地碳储量增长最多，达到81.96 Tg；其次为未利用地，增加了27.75 Tg。草地碳储量减少显著，高达104.84 Tg。灌木、水域、永久冰川和积雪以及建设用地的碳储量基本没发生明显变化。从各时段的碳储量变化量来看，森林的保护和恢复导致林地面积的增加是碳储量增加的主要因素，草地退化是碳储量减少的主要因素。

由于碳储量主要依据土地利用类型的面积及空间分布计算得到，因此土地利用类型的时空转移特征会显著影响碳储量的变化，由图5可知，1990—2020年，从土地利用类型的转出来看，永久冰川和积雪的转出增加的碳储量最大，达到16.45 Tg，主要是转化为未利用地、草地、林地，碳储量分别增加10.86 Tg、3.40 Tg、2.17 Tg；其次是未利用地的转出，使得碳储量增加15.29 Tg，未利用地向草地转化增加了碳储量22.16 Tg，但同时转化为永久冰川和积雪减少了碳储量7.01 Tg；再次为水域和灌木的转出，碳储量分别增加了0.89 Tg、0.004 Tg。草地的转出损失的碳储量最大，达到12.40 Tg，尽管草地转化为林地使得碳储量增加了36.79 Tg，但转化为未利

用地、永久冰川和积雪、水域,碳储量分别减少了46.94 Tg、4.87 Tg、1.95 Tg;湿地、耕地、林地的转出,使得碳储量分别减少了0.56 Tg、0.14 Tg、0.07 Tg。

1990—2020年,从土地利用类型的转入来看,林地转入增加的碳储量最大,达到39.50 Tg,主要是草地转化为林地;其次是草地的转入,碳储量增加25.43 Tg,其中,未利用地转化为草地增加了碳储量22.16 Tg;再次是湿地的转入,碳储量增加4.12 Tg,以草地和耕地转化为湿地为主,其中,草地转化为湿地增加了碳储量4.10 Tg;最后是耕地的转入,碳储量增加0.54 Tg,主要是草地和未利用地转化为耕地。未利用地的转入是碳储量减少的最主要因素,达到35.91 Tg;其次为永久冰川和积雪的转入,碳储量减少11.88 Tg,主要是未利用地和草地转化为永久冰川和积雪,使得碳储量分别减少7.01 Tg、4.87 Tg;最后是建设用地和灌木的转入,碳储量分别减少0.03 Tg、0.003 Tg。

从1990—2000年、2000—2010年、2010—2020年不同时期来看,永久冰川和积雪、未利用地的转出以及草地和林地的转入,均是新疆天山碳储量提升的主要贡献者,碳储量增加主要是由于草地转化为林地和湿地、未利用地转化为草地、永久冰川和积雪转化为未利用地,使得植被覆盖度和生物量提高;草地的转出以及永久冰川和积雪、未利用地的转入是碳储量减少的主要原因,主要表现为草地转化为未利用地、永久冰川和积雪、水域,未利用地转化为冰川和积雪。因草地转出所致的碳储量减少趋势持续增强,是因为山区超载过牧的现象仍未得到根本性解决。永久冰川和积雪、未利用地转出引起的碳储量增长趋势呈现先增加再减少又增加的

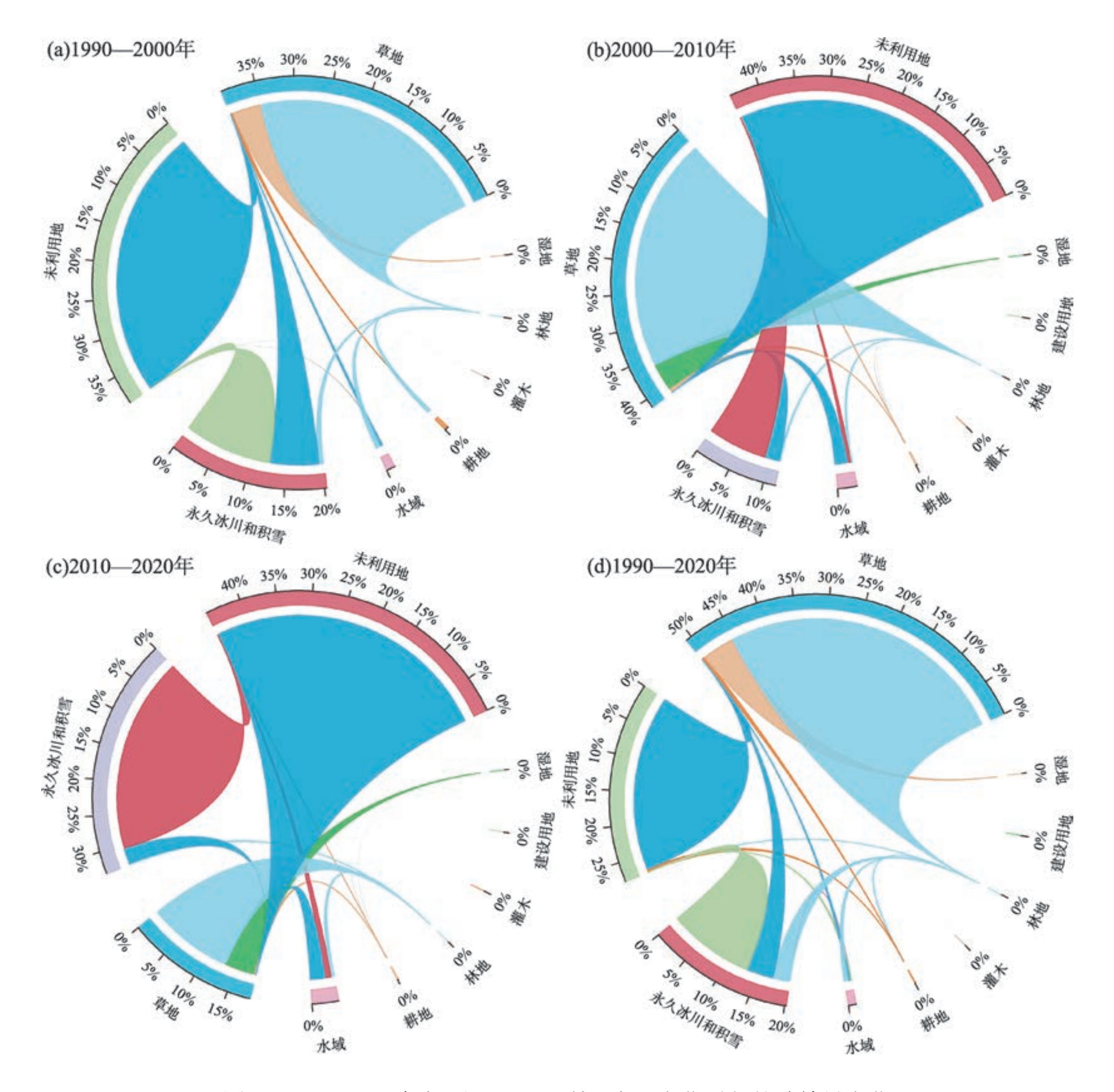


图5 1990—2020年新疆天山土地利用类型变化引起的碳储量变化

Fig. 5 Carbon storage changes caused by land use change in the Xinjiang Tianshan Mountains from 1990 to 2020

波动变化特征,主要由于2000—2010年永久冰川和积雪转化为未利用地、未利用地转化为草地的面积相对减少所致。林地转入引起的碳储量增长趋势持续减弱,是因为随着森林植被逐步恢复,飞播造林、封山育林和退耕还林等规模逐步减小。

3 讨 论

3.1 碳密度适用性分析

以InVEST为评估模型开展陆地生态系统碳储量估算,引入气候变量对碳密度参数进行本地化校正,广泛应用于相关区域碳储量评估,其科学性和合理性已得到验证[21-22]。因此,本研究利用InVEST模型评估1990—2020年新疆天山碳储量及其时空格局演变。为了保证修正后的碳密度在新疆天山的适用性,提高评估结果的准确度,需要利用实测数据或相关研究对修正后的碳密度结果进行精度验证分析。徐丽等[25]通过整合相关实验数据和文献数据发现,新疆天山区域内草地实测地上、地下和土壤碳密度分别介于0.14~1.99 t·hm^{-2},1.74~7.09 t·hm^{-2}和24~253.5 t·hm^{-2},均值分别为0.68 t·hm^{-2},3.70 t·hm^{-2}和126.69 t·hm^{-2}。修正后的草地地上、地下和土壤碳密度均介于实测数据区间内;修正后的草地地上和地下碳密度与实测值的均值较为接近,修正后的草地土壤碳密度与实测值的均值差别较大,相对误差为40.37%,进一步分析采样点的植被覆盖度发现,这些采样点平均覆盖度超过0.5,表明采样点的草地类型主要为高覆盖草地,而中覆盖度草地和低覆盖度草地的采样点相对较少,因此修正的草地土壤碳密度值和实测碳密度值存在较大误差。由于森林、灌丛、湿地的实测数据点均较少,因此不适合作对比验证。张杰等[19]基于第一次和第二次土壤普查数据估算了我国西部土壤碳密度和碳储量,研究发现绿洲农田、森林、灌木、草甸草原、荒漠草原、湿地的平均碳密度分别为79.5 t·hm^{-2}、158.8 t·hm^{-2}、77.1 t·hm^{-2}、123.6 t·hm^{-2}、63.9 t·hm^{-2}、204.2 t·hm^{-2}。与本研究修正后的土壤碳密度相比,林地和草地的土壤碳密度相差较大,相对误差分别为32.10%和19.42%,其余土地利用类型的土壤碳密度较为接近。总体来看,本文研究结果和已有实测数据基本一致,相差不大,表明修正的碳密度具有较高的可信度,能反映研究区碳储量的实际情况,研究结果可为干旱区山地生态系统提升碳汇功能、优化管理措施提供科学依据。此外,InVEST模型碳储量模块基于土地利用类型变化计算碳储量及其时空变化,忽视了光合速率、土壤微生物活动等对碳储量具有重要影响的因素,同时由于简化了碳循环过程,降低了碳储量估算的精确度[7,26],导致碳储量空间格局分布结果的不确定性,但InVEST模型的引入为区域碳储量估算提供了可行的方法。

3.2 碳储量变化影响因素分析

本研究利用InVEST模型评估了1990—2020年新疆天山整体固碳能力以及不同土地利用类型变化引起的碳储量变化。研究表明:近30 a,新疆天山固碳能力持续增强。新疆天山固碳量增加主要受益于森林恢复以及冰川退缩成未利用地,草地退化成未利用地是造成了碳储量减少的直接原因。1978年启动的"三北"防护林工程以及2000年启动的退耕还林还草工程和天然林资源保护工程,重大林草保护工程的推进和实施,森林蓄积面积不断扩大,质量逐步提高,人工林和天然林的碳密度均呈现显著增加[27-28];退耕还林还草工程对固碳能力的提升效果在干旱半干旱区的渭河流域[29]、石羊河流域[30]也得到进一步验证。由于气候变暖导致冰川消退,退缩迹地植被发生初生演替,物质循环开始建立,土壤碳储量逐步增加[31]。新疆天山草地退化主要由气候变化和人类活动引起。尽管天山山区草地在生长季的降雨量有所增加,但气温升高带来的蒸散作用增强,山区的旱情较重[32],生长季发生干旱的频率超过40%[33],直接影响草地的生长状况。放牧活动是新疆草地生态系统面临的主要人类干扰,长期的放牧活动导致碳储量减少的区域不断扩大[34];此外,随着放牧强度的增加,草地植被出现了不同程度的退化,地上碳储量、凋落物碳储量和总碳储量均会出现下降趋势[35]。因此,需要加强草地放牧方式管理,实施以草定畜、保持合理载畜量,实现草畜平衡,增强草地固碳能力。

4 结 论

通过对新疆天山土地利用类型和碳储量时空变化特征进行分析,得出以下结论:

(1) 研究区1990—2020年土地利用类型以草地和未利用地为主,土地利用发生了明显的变化,

具体表现为未利用地、林地和草地面积快速增加,草地和冰川持续减少。

（2）研究区1990—2020年的碳储量分别为1587.17 Tg、1604.47 Tg、1605.45 Tg、1606.66 Tg,累计增加了19.49 Tg;草地、未利用地、林地是研究区重要的碳库。

（3）研究区1990—2020年碳储量空间格局变化较小,空间分布格局与垂直自然带分布密切相关。

（4）研究区草地、永久冰川和积雪、未利用地3种土地利用类型的转化是新疆天山碳储量变化的主要贡献者。研究区林地和未利用地面积的增加是碳储量增加的主要原因,同时草地面积的减少增加了碳储量损失。

综上所述,近年来新疆天山生态系统固碳能力呈增强态势,碳储量增加主要受益于林地、草地等生态用地的增加,碳储量减少主要由草地退化所致。因此,要协同推进退耕还林还草、“三北防护林”等林业重大生态工程,稳定和扩大退耕还林范围,坚持多种造林方式,乔灌草相结合,提升生态系统固碳能力。以《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》为契机,统筹推进山水林田湖草一体化保护和修复,落实草原禁牧休牧轮牧和草畜平衡,开展退牧还草和退化草原修复治理,提高生态系统碳汇增量。加强气候变化监测预警和风险管理,提升干旱区脆弱生态系统应对气候变化的能力。

参考文献(References):

[1] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. Nature, 2009, 458(7241): 1009-1013.

[2] 刘冠, 李国庆, 李洁, 等. 基于InVEST模型的1999—2016年麻塔流域碳储量变化及空间格局研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 267-274. [Liu Guan, Li Guoqing, Li Jie, et al. Study on change in carbon storage and its spatial pattern in Mata Watershed from 1999 to 2016 based on InVEST model[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 267-274.]

[3] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. 中国科学: 生命科学, 2022, 52(4): 534-574. [Yang Yuanhe, Shi Yue, Sun Wenjuan, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality[J]. Science China: Life Science, 2022, 52(4): 534-574.]

[4] 徐钊, 曹国华, 李思刚, 等. 江苏省森林植被碳储量分布结构及变化特征[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(2): 69-75, 91. [Xu Zhao, Cao Guohua, Li Sigang, et al. Characteristics of carbon storage distribution structure and dynamic change of forest vegetation in Jiangsu Province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(2): 69-75, 91.]

[5] 辛晓平, 丁蕾, 程伟, 等. 北方草地及农牧交错区草地植被碳储量及其影响因素[J]. 中国农业科学, 2020, 53(13): 2757-2768. [Xin Xiaoping, Ding Lei, Cheng Wei, et al. Biomass carbon storage and its effect factors in steppe and agro-pastoral ecotones in northern China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(13): 2757-2768.]

[6] 么秀颖, 闫丹丹, 戚丽萍, 等. 中国湿地生态系统碳库对环境变化的响应分析[J]. 环境科学学报, 2022, 42(1): 111-120. [Yao Xiuying, Yan Dandan, Qi Liping, et al. Responses of wetland ecosystem carbon pools to multiple environmental change drivers in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(1): 111-120.]

[7] 郭靖, 王光焰, 徐生武, 等. 水资源管理增强下的塔里木河上中游碳储量动态评估[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 589-599. [Guo Jing, Wang Guangyan, Xu Shengwu, et al. Dynamic assessment of Tarim River carbon storage under enhanced water resources management[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 589-299.]

[8] 李瑾璞, 夏少霞, 于秀波, 等. 基于InVEST模型的河北省陆地生态系统碳储量研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(7): 854-861. [Li Jinpu, Xia Shaoxia, Yu Xiubo, et al. Evaluation of carbon storage on terrestrial ecosystem in Hebei Province based on InVEST model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(7): 854-861.]

[9] 李若玮, 叶冲冲, 王毅, 等. 基于InVEST模型的青藏高原碳储量估算及其驱动力分析[J]. 草地学报, 2021, 29(S1): 43-51. [Li Ruowei, Ye Chongchong, Wang Yi, et al. Carbon storage estimation and its drivering force analysis based on InVEST model in the Tibetan Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(S1): 43-51.]

[10] 方精云, 于贵瑞, 任小波, 等. 中国陆地生态系统固碳效应——中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之生态系统固碳任务群研究进展[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 848-857, 875. [Fang Jingyun, Yu Guirui, Ren Xiaobo, et al. Carbon sequestration in China sterrestrial ecosystems under climatechange: Progress on ecosystem carbon sequestration from the CAS strategic priority research program[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(6): 848-857, 875.]

[11] 刘友存, 焦克勤, 赵奎, 等. 中国天山地区降水对全球气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 748-759. [Liu Youcun, Jiao Keqin, Zhao Kui, et al. The response of precipitation to global climate change in the Tianshan Mountains, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 748-759.]

[12] Xu X, Yang Z, Saiken A, et al. Natural Heritage value of Xinjiang Tianshan and global comparative analysis[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 9(2): 262-273.

[13] 许文强, 杨辽, 陈曦, 等. 天山森林生态系统碳储量格局及其影

响因素[J]. 植物生态学报, 2016, 40(4): 364-373. [Xu Wenqiang, Yang Liao, Chen Xi, et al. Carbon storage, spatial distribution and the influence factors in Tianshan forests[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(4): 364-373.]

[14] 胡汝骥. 中国天山自然地理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004. [Hu Ruji. Natural Geography of Tianshan Mountains, China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004.]

[15] Chen Y, Li W, Deng H, et al. Changes in Central Asia's Water Tower: Past, Present and Future[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 35458.

[16] Groombridge B, Jenkins M. Global Biodiversity: Earth's Living Resources in the 21st Century[M]. Cambridge, UK: World Conservation Press, 2000.

[17] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.

[18] 史名杰, 武红旗, 贾宏涛, 等. 基于MCE-CA-Markov和InVEST模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 1010-1019. [Shi Mingjie, Wu Hongqi, Jia Hongtao, et al. Temporal and spatial evolution and prediction of carbon stocks in Yili Valley based on MCE-CA-Markov and InVEST models[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(6): 1010-1019.]

[19] 张杰, 李敏, 敖子强, 等. 中国西部干旱区土壤有机碳储量估算[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(9): 132-137. [Zhang Jie, Li Min, Ao Ziqiang, et al. Estimation of soil organic carbon storage of terrestrial ecosystem in arid western China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(9): 132-137.]

[20] Zhu G, Qiu D, Zhang Z, et al. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 127: 107770.

[21] Tang X, Zhao X, Bai Y, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4021-4026.

[22] Zhou J, Zhao Y, Huang P, et al. Impacts of ecological restoration projects on the ecosystem carbon storage of inland river basin in arid area, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 118: 106803.

[23] 周德成, 罗格平, 韩其飞, 等. 天山北坡不同海拔梯度山地草原生态系统地上净初级生产力对气候变化及放牧的响应[J]. 生态学报, 2012, 32(1): 81-92. [Zhou Decheng, Luo Geping, Han Qifei, et al. Impacts of grazing and climate change on the aboveground net primary productivity of mountainous grassland ecosystems along altitudinal gradients over the Northern Tianshan Mountains, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(1): 81-92.]

[24] 刘洋, 张军, 周冬梅, 等. 基于InVEST模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4052-4065. [Liu Yang, Zhang Jun, Zhou Dongmei, et al. Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River Basin based on InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4052-4065.]

[25] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2019, 4(1): 90-96. [Xu Li, He Nianpeng, Yu Guirui. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s)[J]. China Scientific Data, 2019, 4(1): 90-96.]

[26] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于InVEST和CA-Markov模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29(6): 1018-1029. [Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Spatio-temporal evolution of carbon stocks in the Yellow River Basin based on InVEST and CA-Markov models[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 1018-1029.]

[27] 张林, 王礼茂. 三北防护林体系森林碳密度及碳贮量动态[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(8): 136-140. [Zhang Lin, Wang Limao. Dynamic forest carbon density and storage in the "Three North" protective forest system[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(8): 136-140.]

[28] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973. [Fang Jingyun, Chen Anping. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance [J]. Acta Botanica Sinica, 2001, 43(9): 967-973.]

[29] 徐省超, 赵雪雁, 宋晓谕. 退耕还林(草)工程对渭河流域生态系统服务的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3893-3904. [Xu Shengchao, Zhao Xueyan, Song Xiaoyu. Impacts of the returning farmland to forest (grassland) project on ecosystem services in the Weihe River Basin, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 3893-3904.]

[30] 王玉纯, 赵军, 付杰文. 退耕还林还草工程对干旱区内陆河流域生态系统服务的影响[J]. 生态科学, 2021, 40(6): 56-66. [Wang Yuchun, Zhao Jun, Fu Jiewen. Effects of the grain for green program on the ecosystem services of inland river basin in arid area [J]. Ecological Science, 2021, 40(6): 56-66.]

[31] 徐丽萍, 李鹏辉, 李忠勤, 等. 新疆山地冰川变化及影响研究进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 946-959. [Xu Liping, Li Penghui, Li Zhongqing, et al. Advances in research on changes and effects of glaciers in Xinjiang mountains[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(6): 946-959.]

[32] 吴秀兰, 段春锋, 玛依拉·买买提艾力, 等. 基于MCI的新疆近60 a干旱时空特征分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 75-83. [Wu Xiulan, Duan Chunfeng, Mayila Maimaitiaili, et al. Analysis of the temporal-spatial variation characteristics of drought in the Xinjiang based on the meteorological drought comprehensive index [J]. Arid Zone Research, 2019, 39(1): 75-83.]

[33] 郭燕云, 胡琦, 傅玮东, 等. 基于SPEI指数的新疆天山草地近55 a干旱特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 670-676. [Guo Yanyun, Hu Qi, Fu Weidong, et al. Drought trend over the grasslands in the Tianshan Mountains, Xinjiang in recent 55 years based on SPEI[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 670-676.]

[34] 赵鹏, 陈桃, 王茜, 等. 气候变化和人类活动对新疆草地生态系

统NPP影响的定量分析[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(1): 51−62. [Zhao Peng, Chen Tao, Wang Qian, et al. Quantitative analysis of the impact of climate change and human activities on grassland ecosystem NPP in Xinjiang[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2020, 37(1): 51−62.]

[35] 孙霞, 丁娓, 贾宏涛, 等. 模拟放牧对天山北坡草甸草原生态系统碳储量的影响[J]. 草业科学, 2016, 33(3): 377−384. [Sun Xia, Ding Wei, Jia Hongtao, et al. Effect of simulated grazing on carbon storage of meadow grassland ecosystem in the north slope of Tianshan Mountain[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(3): 377−384.]

Research on the spatio-temporal variation of carbon storage in the Xinjiang Tianshan Mountains based on the InVEST model

LU Yayan[1,2], XU Xiaoliang[1,3], LI Jicai[2,4], FENG Xiaohua[5], LIU Luyuan[6]

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Tourism, Xinjiang University of Finance and Economics, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 4. Forestry and Grassland Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 5. Northwest Investigation and Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710048, Shanxi, China; 6. Northeastern University, Boston 02115, USA)

Abstract: Understanding the impact of land use change on ecosystem carbon storage is important for protecting mountain ecosystems and regional economic and socially sustainable development in arid areas. Based on the land use data of the Xinjiang Tianshan Mountains from 1990 to 2020, the carbon storage and its spatial distribution pattern of the study area from 1990 to 2020 were estimated using the InVEST model carbon storage module, and the influence of land use change on carbon storage was analyzed. The results showed that: (1) The land use types of the study area were mainly grassland and unused land, followed by permanent glaciers and snow, and forest land, with very little area of shrubs, waters, construction land, and wetlands. (2) The carbon storage showed a continuous trend, with a total increase of 19.49 Tg. Grassland, unused land, and forest land contributed the most to the total carbon storage. (3) The spatial distribution pattern of carbon storage in the last 30 years was relatively stable, and nearly 88% of the regions are significantly unchanged. The spatial distribution pattern was closely related to the vertical natural zone distribution. (4) The transformation of three land use types: grassland, permanent glaciers and snow, and unused land, was the main contributor to the spatial and temporal evolution of carbon storage in the Tianshan Mountains. This study can provide scientific support for carbon balance management and policy formulation of emission reduction and sink enhancement in mountain ecosystems in arid regions. It is also important for building the Green Silk Road and the China-Central Asia community of destiny.

Keywords: carbon storage; ecosystem service; InVEST model; mountain ecosystem; Xinjiang Tianshan Mountains